

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
\_\_\_\_\_ Кружаев В.В.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы  
развития УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:

Создание математической модели вторичного уноса частиц в электроциклоне

(Заключительный)

Договор возмездного оказания услуг (выполнения работ, на создание  
произведения) №1.2.2.3/65

Зав.кафедрой

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

С.А. Ермаков

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

С.А. Ермаков

Исполнитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.Г. Титов

Екатеринбург 2013

## Реферат

1. ФИО автора (ов): Титов Анатолий Геннадьевич

Author: Titov Anatolii Gannagevich

2. Аннотация: Проект посвящен разработке математической модели вторичного уноса частиц в электроциклоне. Задача данной работы - получить адекватное уравнение для расчета эффективности электроциклона с учетом вторичного уноса.

Annotation: The project deals with the development of a mathematical model of re-entrainment of particles in elektrocyclone. The objective of this work - to obtain adequate equation for calculating the efficiency elektrocyclone considering re-entrainment.

3. Ключевые слова: пылегазоочистка, электрофильтр, циклон, электроциклон, летучая зола, вторичный унос

Key words: Dust Filtration, electrostatic precipitator, cyclone, elektrocyclone, fly ash, re-entrainment.

4. Тема отчета: Создание математической модели вторичного уноса частиц в электроциклоне.

Paper theme: Creating a mathematical model of re-entrainment of particles in elektrotsiklone

## **Оглавление**

Реферат.....	2
Обозначения и сокращения.....	4
Введение .....	5
Модель вторичного уноса .....	6
Заключение .....	11
Список литературы.....	12

## **Обозначения и сокращения**

ТНЖ – тягонапоромер жидкостной;

ТЭС – теплоэлектростанция;

ЭЦВ – электроциклон вертикальный

## **Введение**

В Уральском регионе РФ тепловые электростанции (ТЭС) используют высокочольный каменный уголь Экибастузского месторождения. Поэтому в отходящих газах ТЭС содержание летучей золы достигает  $50 \text{ г/м}^3$ .

Одним из вариантов решения задачи является использование в пылеулавливающих аппаратах одновременно нескольких силовых полей. Например, в центробежных пылеуловителях-циклонах можно создать сильное электрическое поле. Благодаря этому, кроме центробежных сил, на пылевые частицы будут действовать кулоновские силы. Очевидно, что совместное действие указанных сил обеспечит высокую степень очистки газа также от более мелких частиц. Это подтверждено на практике при использовании электроциклонов.

## Модель вторичного уноса

Экспериментально было показано снижение степени очистки при увеличении скорости аэрозоля на входе в электроциклон свыше 15-17 м/с. Как было отмечено выше, при увеличении скорости газа в активной зоне возрастает центробежная сила, что благоприятствует осаждению частиц, но при постоянной длине аппарата время пребывания аэрозоля в активной зоне аппарата уменьшается, снижается эффективность зарядки частиц, увеличивается унос золы, это значит, что частицы не успевают осесть на осадительный электрод, увеличивается вторичный унос, т.к. уже осевшие частицы, особенно мелкие, выбиваются из слоя осадка крупными частицами и турбулентными вихрями.

Чтобы оценить степень влияния времени пребывания и вторичного уноса на снижение эффективности улавливания частиц в электроциклоне требуется исключить один из факторов. Для исключения вторичного уноса необходимо орошать осадительный электрод пленкой воды. Тогда частицы, осевшие на пленку воды, не смогут вернуться обратно в поток газа, а будут необратимо удаляться из активной зоны.

Чтобы оценить влияние на степень очистки электроциклона концентрации и скорости аэрозоля на входе в аппарат при минимальном количестве необходимых опытов с сохранением статистической достоверности результатов проведено планирование эксперимента [1 – 2].

За параметр оптимизации принята степень очистки газа. Степень очистки газа в электроциклоне зависит от многих параметров. Приведя некоторые основные из них, получим общее выражение (1) для функции отклика:

$$\eta = f(U, \omega, c, l, \rho_{\text{ч}}, \rho_{\text{эл}}, a) \quad (1)$$

где  $U$  – рабочее напряжение,  $\omega$  – скорость газового потока во входной трубе,  $c$  – концентрация аэрозоля на входе в аппарат,  $l$  – длина активной зоны,  $d$  – диаметр частиц,  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц,  $\rho_{\text{эл}}$  – удельное электрическое сопротивление частиц,  $a$  – адгезия частиц.

Чтобы получить уравнение регрессии, построим центральный композиционный рототабельный план, включающий 2 фактора:  $X_1$  – скорость газового потока во входной трубе,  $X_2$  – концентрация аэрозоля на входе в аппарат.

Общий вид [3] квадратичного уравнения регрессии для двух факторов:

$$\eta = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (2)$$

где  $\eta$  - степень очистки газов,  $b_0$  – свободный член,  $b_i$  – коэффициенты линейных членов,  $b_{1i}$  – коэффициент взаимодействия членов.

Поскольку перечисленные выше факторы независимы, то можно отбросить члены уравнения, отражающие эффекты взаимодействия. Тогда уравнение регрессии примет вид (3):

$$\eta = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (3)$$

Для вычисления коэффициентов уравнения регрессии построим матрицу планирования, взяв за основу центральный композиционный рототабельный план, включающий «звездные» точки. Общее количество экспериментов вычисляется по формуле (4):

$$n = 2^x + 2x + n_0 \quad (4)$$

Для двухфакторного эксперимента число опытов в центре плана  $n_0$  равно 5, а величина «звездного» плеча составляет 1,414 [4].

Подставив соответствующие значения в уравнение (4), вычислим необходимое число экспериментов:

$$n = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13$$

Значения каждого фактора в плане кодируются значениями: «-1» - минимальное, «0» - среднее, «+1» - максимальное, кроме того, в план вводятся по 2 «звездные» точки на каждый фактор с кодировкой «-1,414» и «+1,414». Матрица эксперимента с кодированными значениями факторов приведена в таблице 2.3.1:

Таблица 1: Матрица планирования эксперимента с электроциклоном ЭЦВ

№ опыта	Значение фактора		№ опыта	Значение фактора	
	$X_1$	$X_2$		$X_1$	$X_2$
1	-1	-1	7	0	-1,414
2	-1	1	8	0	1,414
3	1	-1	9	0	0
4	1	1	10	0	0
5	-1,414	0	11	0	0
6	+1,414	0	12	0	0
			13	0	0

Установим основной уровень  $Z_{0,i}$  и интервалы варьирования  $\Delta Z_i$  для каждого фактора. Основной уровень  $Z_{0,1}$  для фактора  $X_1$  (скорость газового потока во входной трубе) примем равным 21 м/с,  $\Delta Z_1 = 4,5$ ,  $Z_{0,2}$  для фактора  $X_2$  (концентрация аэрозоля на входе в аппарат) примем равным 16,5 г/м<sup>3</sup>,  $\Delta Z_2 = 10$ . Рассчитанные значения сведем в таблицу 2.

Таблица 2: Варьирование факторов

Факторы			Интервал варьирования факторов	Уровни варьирования факторов				
Обозначение	Название	Размерность		-1,414	-1	0	+1	+1,414
$X_1$	Скорость газового потока на входе в аппарат	м/с	4,5	14,6	16,5	21,0	25,5	27,4
$X_2$	Концентрация аэрозоля на входе в аппарат	г/м <sup>3</sup>	10	2,4	6,5	16,5	26,5	30,6



Рандомизация [5] последовательности проведения опытов с помощью ЭВМ дала следующий порядок: 13, 4, 10, 8, 3, 9, 1, 2, 6, 12, 5, 11, 7. Подаваемое на электроды напряжение не изменяется и составляет 17 кВ.

По построенной матрице были проведены эксперименты, по результатам которых с помощью ЭВМ получено уравнение регрессии:

$$\eta = 88,69 + 9,29x_1 + 5,24x_2 + 0,48x_1^2 + 1,13x_2^2 \quad (5)$$

Из уравнения видно, что параметр  $x_1$  – скорость на входе в электроциклон оказывает влияние практически в 2 раза сильнее, чем параметр  $x_2$  – концентрация аэрозоля на входе. Наименьшее значение наблюдается при максимальной скорости и наименьшей концентрации. По-видимому, это связано с тем, что времени пребывания не достаточно для осаждения частиц, а также с повышенным вторичным уносом.

В общем, можно утверждать о сравнительно низкой эффективности электроциклона при скоростях свыше 15-17 м/с, которая стремительно падает до 70-75% при скорости 27 м/с.

График, визуализирующий уравнение регрессии (2.3.5), изображен на рис. 2.3.1. Белыми точками показаны экспериментальные данные, поверхность – рассчитанная по уравнению регрессии, цветом отмечена эффективность электроциклона.

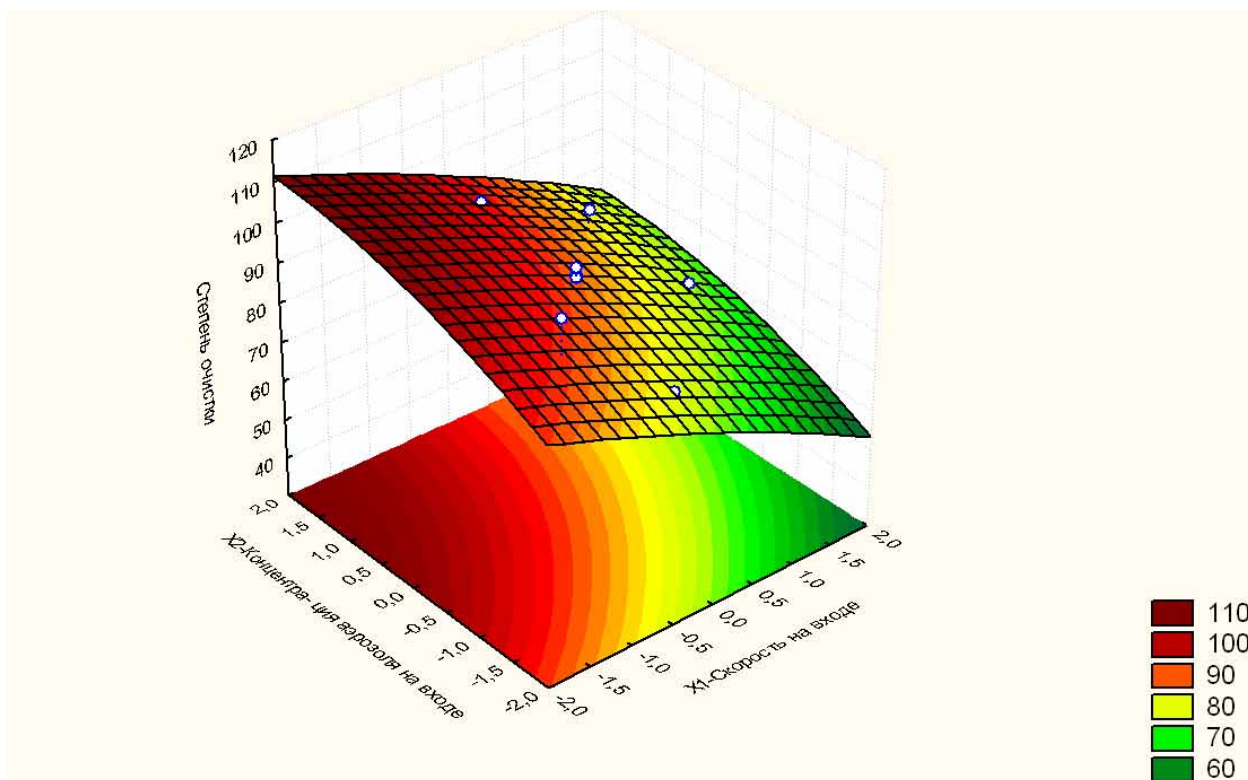


Рис. 1.: Поверхность отклика функции (степени очистки аэрозоля в электроциклоне при сухом режиме) двух переменных

## **Заключение**

В рамках реализации проекта была разработана математическая модель вторичного уноса в электроциклоне, проведено планирование эксперимента, получены опытные данные. Полученная математическая модель – полуэмпирическая, позволяет рассчитывать степень очистки аэрозоля в электроциклоне.

## Список литературы

1. Блохин, В. Г., Глудкин, О. П., Гуров, А. И., & Ханин, М. А. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов. Москва: Радио и связь. 1997.
2. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. Москва: Химия. 1985.
3. Кнуянц, И. Л.. Краткая химическая энциклопедия. Москва. 1961. 670 с.
4. Красовский, Г. И., Филаретов, Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск: изд-во БГУ. 1982.
5. Интернет-сайт Статистика. Дата образования 21. 10. 2013 г., URL-адрес: [http://www.statsoft.ru/statportal/tabID\\_\\_50/MId\\_\\_449/ModeID\\_\\_0/PageID\\_\\_341/DesktopDefault.aspx](http://www.statsoft.ru/statportal/tabID__50/MId__449/ModeID__0/PageID__341/DesktopDefault.aspx)